

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УДАРНО-ВОЛНОВОГО ПРОЦЕССА ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВЕ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Кузнецова Н.С.¹

¹*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Институт физики высоких технологий, Томск, Россия (634050, проспект Ленина 30), e-mail: Natalia_Kuznetsova@tpu.ru*

Предложена физико-математическая модель электровзрыва в среде, согласованно описывающая работу разрядного контура, расширение разрядного канала, генерацию и распространение ударно-волновых возмущений и механических напряжений в диэлектрических материалах. Модель позволяет исследовать основные закономерности трансформации энергии накопителя в энергию плазмы канала и преобразование этой энергии в энергию ударной волны, разрушающей твердое тело. Анализируются энергетические характеристики волновых возмущений, генерируемых электровзрывом в горной породе для прогноза картины разрушения в зависимости от параметров разрядного контура. Теоретическое моделирование динамики электровзрыва в твердых диэлектрических материалах позволит создать последовательное описание физических процессов, которые лежат в основе электроразрядных технологий обработки твердых непроводящих материалов. Верифицированная тестовыми испытаниями количественная модель явления электровзрыва в твердых телах позволит оптимизировать параметры высоковольтных импульсных генераторов, конструкции электродных систем создаваемого технологического оборудования.

Ключевые слова: электровзрыв, физико-математическая модель, моделирование, ударно-волновой процесс

INVESTIGATION OF POWER CHARACTERISTICS OF SHOCK-WAVE PHENOMENON AT ELECTRO-BLAST IN SOLID

Kuznetsova N.S.¹

¹*National Research Tomsk Polytechnic University, Institute of High Technology Physics, Tomsk, Russia (30 Lenin Avenue, 634050), e-mail: Natalia_Kuznetsova@tpu.ru*

The physical and mathematical model of electro-blast in solid, which consistently describes the operation of the discharge circuit, plasma channel expansion, generation and propagation of the shock-wave disturbances and mechanical stresses in dielectrics is presented. The model allows investigation the basic laws of stored generator energy conversion into the discharge channel energy and transformation of this energy into the shock-wave energy demolishing the solid material. Power characteristics of wave disturbances generated by expanding plasma channel in rock depending on the discharge circuit parameters are analyzed for the fracture pattern prediction. Simulation of electro blast dynamics in solids consecutively describes the physical processes underlying on electro discharge technologies of solid non-conducting materials processing. The quantitative model of electro blast in solids verified by tests will allow optimization of pulse generator parameters and electrode system constructions of high-voltage equipment.

Key words: electro-blast, physical and mathematical model, simulation, shock-wave process

Электровзрыв является фундаментальным явлением электрофизики диэлектриков, вместе с предшествующим электрическим пробоем, определяющим поведение материалов в сильных электрических полях. Характер разрушения твердых диэлектрических тел при электровзрыве определяется двумя основными факторами: спецификой поля механических напряжений, формируемого распространяющейся волной, и крайне неравномерным распределением энергии в волне. Оба фактора обусловлены небольшими радиальными размерами разрядного канала порядка (10^{-4} – 10^{-6}) м. Малый радиус канала приводит к резкому снижению амплитуды волны в окрестности разрядного канала, вызванному ее дивергенцией в радиальном направлении. Ударная волна, излучаемая расширяющимся

каналом, вырождается в упругую с выраженной областью растягивающих тангенциальных напряжений [1], которые стимулируют зарождение радиальных трещин. По мере распространения волны плотность энергии в ее головной части также резко снижается. В результате этого ухудшается подпитка энергией устьев образовавшихся трещин, в итоге уменьшаются их число и протяженность. Результирующая картина разрушения представляет область раздавливания материала диаметром порядка 3–5 мм в окрестности канала и более протяженную (около 3–5 см) область растрескивания, покрытую радиальными трещинами.

Анализ рассмотренных процессов актуален для совершенствования электроразрядных технологий и диктуется требованиями оптимизации параметров генератора и режимов разряда, согласованных с волновой динамикой в обрабатываемом материале и условиями его разрушения.

Для решения этой проблемы предложена физико-математическая модель, согласованно описывающая разряд конденсатора и динамику электровзрыва, связь электротехнических характеристик с напряженно-деформированным состоянием материала, вызывающим его разрушение.

Физико-математическая модель электровзрыва

Электротехническая часть электровзрыва описывается разрядом конденсатора C в цепи (рис.1).

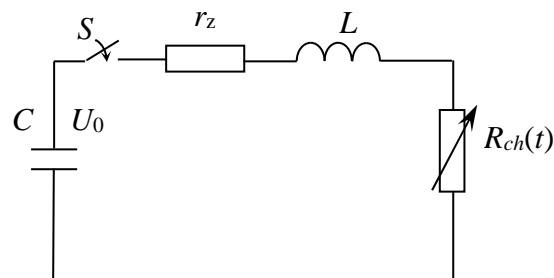


Рис. 1. Электрическая схема разрядной цепи

При замыкании ключа S (рис. 1) в диэлектрике формируется разрядный канал радиусом r_{ch0} , в плазме которого и в активном сопротивлении r_z (сопротивление коммутатора S и проводов разрядного контура) из конденсатора C выделяется запасенная в нем энергия $W_g = CU_0^2/2$. Индуктивность L состоит из индуктивности конденсатора C , соединительных проводов и разрядного канала длиной l_{ch} . Канал разряда с сопротивлением $R_{ch}(t)$ моделировался цилиндром радиусом $r_{ch}(t)$ и длиной l_{ch} , расширяющимся в радиальном направлении (рис. 2).

Ввод энергии в плазменный канал приводит к росту давления в нем, увеличению его радиальных размеров, генерированию волн механических напряжений. Необходимо отметить, что быстрозатухающие ударные волны в конденсированных диэлектриках с

давлением на фронте до 10^8 – 10^9 Па наблюдаются уже на стадии формирования ветвящихся разрядных каналов. Однако основное разрушающее действие оказывают волны давления, генерируемые при радиальном расширении канала после завершения пробоя.

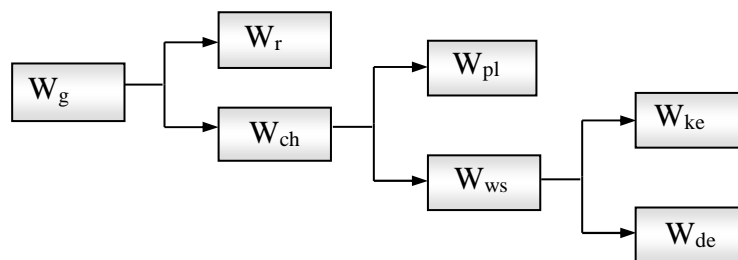


Рис. 2. Схема расположения канала после пробоя (а), поперечное сечение канала (б), R – текущая координата в материале; 1 – канал, 2 – образец, 3 – электроды, 4 – ударная волна, 5 – внешняя граница твердого тела

Без учета энергетических потерь на электрической пробой (обычно составляющих порядка 10 Дж) схема преобразования энергии приведена на рисунке 3. Энергия накопителя W_g при разряде конденсатора частично расходуется в активном сопротивлении контура W_r и в основном выделяется в разрядном канале W_{ch} . Последняя составляющая расходуется на нагрев плазмы W_{pl} и совершение работы по ее расширению W_{ws} , т.е. в энергию ударной волны в твердом теле. Среда, охваченная волной, деформируется в радиальном направлении и расширяется. Энергия волны трансформируется во внутреннюю энергию твердого тела W_{de} и кинетическую энергию его центробежного движения относительно канала W_{ke} .

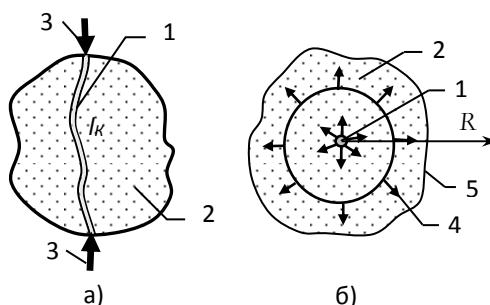


Рис. 3. Схема преобразования электрической энергии в энергию ударно-волнового возмущения

Потерями энергии на формирование канала пробоя пренебрегаем. Потери энергии, вызванные излучением и возможным истечением продуктов разряда из канала, в расчетах не учитывались. Нагружаемый материал в рассматриваемом интервале времени полагался сплошным. Прогноз разрушающего действия электровзрыва проводился на основе эпюр тангенциального напряжения и радиального распределения энергии в волне. При этом полагалось, что разрушающее действие обусловлено только энергией деформирования среды.

Согласно схеме преобразования энергии и с учетом принятых допущений математическая модель включала: уравнения Кирхгофа разрядной цепи, уравнение

энергобаланса разрядного канала и уравнения, описывающие упругопластическое деформирование твердой среды вокруг канала.

Уравнения Кирхгофа

$$L di/dt + (r_z + R_{ch}) \cdot i = U, \quad dU/dt = -i/C, \quad (1)$$

с начальными условиями для силы тока $i(0)=0$ и напряжения $U(0)=U_0$, где U_0 – начальное напряжение, позволяют рассчитать силу тока в цепи $i(t)$, сопротивление канала $R_{ch}(t)$, омические потери в цепи W_R на r_z и динамику энерговода в плазму канала $W_{ch}(t)$:

$$W_R(t) = \int_0^t i^2(t) r_z dt, \quad W_{ch}(t) = \int_0^t i^2(t) \cdot R_{ch}(t) dt. \quad (2)$$

Сопротивление плазменного канала определялось через интеграл действия тока по соотношению Ромпе—Вайцеля, широко применяемому для искры в газах:

$$R_{ch}(t) = A_{mid} \cdot l_{ch} / \sqrt{\int_0^t i^2(t) dt}, \quad (3)$$

где $A_{mid}=611 \text{ В} \cdot \text{с}^{1/2} \cdot \text{м}^{-1}$ – искровая постоянная [2].

Зависимости $W_{ch}(t)$ использовались в уравнении энергобаланса канала, которое является ключевым соотношением, связывающим электротехническую часть электровзрыва с волновой динамикой в среде и определяющим преобразование энергии разряда в энергию плазмы и работу, совершаемую каналом при расширении:

$$dW_{ch} = P_{ch} d(\pi r_{ch}^2 \cdot l_{ch}) + d(P_{ch} \cdot \pi r_{ch}^2 \cdot l_{ch})/(\gamma - 1). \quad (4)$$

Первое слагаемое описывает приращение работы, совершаемой расширяющимся каналом, при изменении его объема $V_{ch} = \pi r_{ch}(t)^2 l_{ch}$ под действием давления внутри канала P_{ch} . Здесь $W_{pl} = P_{ch} \cdot V_{ch}/(\gamma - 1)$ – энергия плазмы, расширяющейся в адиабатическом приближении с показателем γ .

Напряженно-деформированное состояние упругопластической среды вокруг канала рассматривалось в сечении, перпендикулярном оси канала, как движение среды по соотношениям [5]:

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{R}{r} \frac{d\sigma_1}{dr} + V \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{R}, \quad (5)$$

$$\sigma_1 = S_1 - P, \quad \sigma_2 = S_2 - P, \quad \frac{\partial R}{\partial t} = u, \quad (6)$$

$$V = V_0 \cdot \frac{R}{r} \cdot \frac{dR}{dr}, \quad V = \frac{1}{\rho}, \quad V_0 = \frac{1}{\rho_0}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -P \frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot S_1 \cdot \dot{\epsilon}_1 + V \cdot S_2 \cdot \dot{\epsilon}_2, \quad (8)$$

$$\dot{S}_1 = 2\mu \cdot \left(\dot{\epsilon}_1 - \frac{1}{3} \frac{\dot{V}}{V} \right), \quad \dot{S}_2 = 2\mu \cdot \left(\dot{\epsilon}_2 - \frac{1}{3} \frac{\dot{V}}{V} \right), \quad (9)$$

$$\dot{\epsilon}_1 = \frac{\partial u}{\partial R}, \quad \dot{\epsilon}_2 = \frac{u}{R}, \quad (10)$$

где r и R – начальная и текущая координаты элементов среды, ρ , ρ_0 , P , u , σ_i , S_i , $\dot{\epsilon}_i$, e – текущая и начальная плотность среды, давление, массовая скорость, напряжения, компоненты девиатора напряжений, компоненты тензора скоростей деформации, внутренняя энергия единицы массы среды, μ – модуль сдвига для данного материала.

Для расчета текучести использовалось условие текучести Мизеса.

В качестве модельной среды выбран гранит с ударной адиабатой:

$$P = \rho_0 c_l^2 (\rho/\rho_0 - 1)(\rho/\rho_0)^n, \quad (11)$$

где $\rho_0=2,67$ г/см³, $c_l=5850$ м/с — скорость упругой волны, $n=2$ – константа, характеризующая вещество, $\mu = 31,6 \cdot 10^9$ Па, $Y=0,25 \cdot 10^9$ Па – предел текучести.

Энергия деформирования и кинетическая энергия рассчитывались из соотношений:

$$W_{de} = 2\pi l_{ch} \cdot \int_{r_{ch}}^{r_w} e \rho R dR, \quad W_{ke} = \pi l_{ch} \cdot \int_{r_{ch}}^{r_w} u^2 \rho R dR, \quad (12)$$

$$W_{ws} = 2\pi l_{ch} \int_0^t P_{ch} r_{ch} dr_{ch} = W_{de} + W_{ke}, \quad (13)$$

где r_w – радиус области, охваченной распространяющейся волной.

Приведенные уравнения интегрировались численно [5] с нулевыми начальными условиями $t=0$: $R=r$, $U(r)=0$, $\rho(r)=\rho_0$, $\sigma_i(r)=0$, $e(r)=0$ для $r>r_{ch}=r_0$ и граничным условием в виде $P_{ch}(t)$.

Начальный радиус канала принимался 5 мкм. Эффективный показатель адиабаты $\gamma=1,1$ [3]. Параметры контура изменялись в диапазонах $C=5-20$ нФ, $U_0=250-350$ кВ, $L=10-25$ мкГн, $r_z=1$ Ом. Длина канала $l_{ch}=0,5-2$ см.

Результаты моделирования

Типичные зависимости, иллюстрирующие преобразование энергии накопителя для трех значений генерирующей емкости (типичных параметров для электроразрядных технологий), приведены на рисунке 4, где приняты следующие обозначения: $W_g = CU_0^2/2$, объемная плотность энергии в канале $w = W_{ch} / \pi r_{ch}^2 l_{ch}$, коэффициенты преобразования энергии в канал $\eta_{ch} = W_{ch} / W_g$ и в волну $\eta_{ws} = W_{ws} / W_g$.

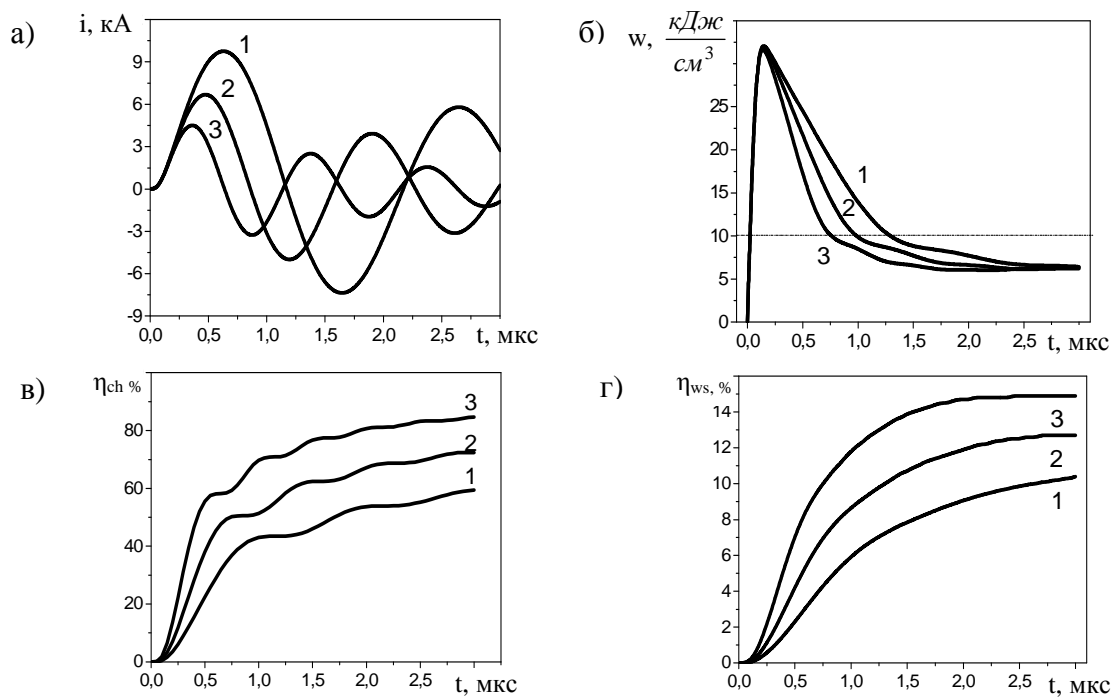


Рис. 4. Временные зависимости тока i (а), объемной плотности энергии w (б), коэффициента преобразования энергии разряда в энергию канала η_{ch} (в) и энергии волны η_{ws} (г) при $U_0=200$ кВ, $L=5$ мкГн, C , нФ: 1 – 20, 2 – 10, 3 – 5

Анализ полученных зависимостей показывает, что основной этап формирования волны напряжений в твердой среде заканчивается к концу первого полупериода разрядного тока $t \approx \pi\sqrt{LC}$. Вторая и последующие токовые пульсации много слабее влияют на энергетику волны. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, эффективность преобразования энергии в энергию волны в рассмотренных режимах не превышала 15%. Во-вторых, разрядный канал является эффективным источником импульсной нагрузки лишь на начальном этапе разряда (в течение $t \approx \pi\sqrt{LC}$). Это следует из рисунка 4 (б), где объемная плотность энергии в плазме канала сопоставлена с объемной плотностью энергии нитроглицерина $w_n \approx 10 \text{ кДж} / \text{см}^3$ (штриховая линия) [3]. В это время канал интенсивно расширяется и генерирует в окружающую среду ударную волну. По мере расширения канала объемная плотность энергии значительно снижается, соответственно разрядный канал теряет свойства источника взрывного нагружения. В связи с этим дополнительный ввод энергии во второй и последующих пульсациях тока менее эффективен с целью увеличения энергии волны. На рисунке 4 (в, г) показано изменение двух основных параметров η_{ch} и η_{ws} , определяющих эффективность преобразования энергии W_g в канал и ударную волну. Видно, что в течение первого полупериода вводится основная доля энергии W_g . Соответственно этому и волна в основном формируется в этом временном интервале.

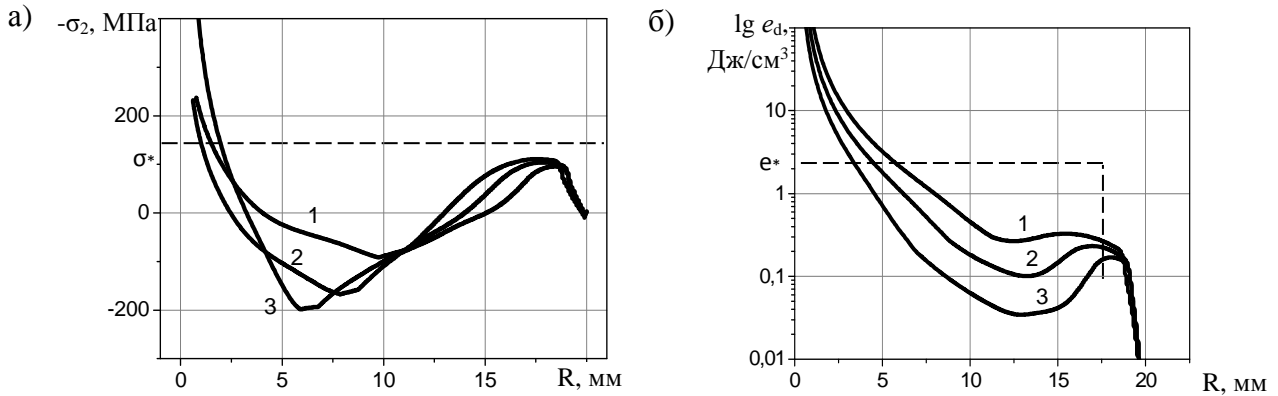


Рис. 5. Эпюры тангенциального напряжения σ_2 (а) и радиальные распределения концентрации энергии e_d (б) в волне при $t=3$ мкс, $U_0=200$ кВ, $L=10$ мкГн, C , нФ: 1 – 20, 2 – 10, 3 – 5

Сравнение полученных зависимостей показывает, что с увеличением емкости накопителя абсолютные величины W_{ch} и W_{ws} растут, но их относительные величины η_{ch} и η_{ws} снижаются. Эта закономерность обусловлена менее быстрым ростом W_{ch} и W_{ws} по отношению к W_g .

Соответствующие эпюры тангенциальных напряжений в среде и радиальные распределения концентрации энергии деформирования в волне приведены на рисунке 5. Величина $e_d(R)$ показывает количество энергии деформирования W_{de} , сосредоточенное в объеме данного слоя вещества.

Из эпюр σ_2 следует, что в волне образуется область растяжения, в которой уровень напряжений превосходит предел прочности гранита на разрыв $\sigma^*=8$ МПа [6]. Это означает, что в рассмотренном диапазоне изменения энергии накопителя и параметров разрядного промежутка в среде возникнут условия для развития радиальных трещин и разрушения материала. Количество и протяженность трещин в основном будут определяться характером распределения энергии в волне. Из рисунка 5, б (кривая 1) следует, что наибольшая концентрация энергии деформирования достигается в окрестности канала. В области ($r_{ch} < R \leq 2,5$ мм) величина сжимающих напряжений и концентрация энергии достаточны для переизмельчения среды. По мере удаления от канала объемная плотность энергии снижается. И для $R \geq R^* \approx 18$ мм (рис. 5, б, кривая 1) концентрация энергии в веществе согласно [7] становится ниже плотности эффективной энергии разрушения e^* . Следовательно, приток энергии в устье трещины будет недостаточен, и ее рост, вызванный прохождением прямой волны, на этом расстоянии от канала прекратится. В области $2,5 \leq R \leq R^*$ в зависимости от величины отношения $n = e_d / e^*$ возможно проращение n трещин. Из сравнения распределений σ_2 и e_d также следует, что с уменьшением энергии импульса область растягивающих тангенциальных напряжений образуется раньше, но уровень

соответствующих энергетических характеристик волны существенно снижается (рис. 5, б, кривые 2, 3). Это означает, что условия зарождения трещин реализуются и при относительно небольших энерговкладах в разряд, но энергии волны для развития сетки протяженных трещин недостаточно. Результаты выполненного анализа качественно согласуются с экспериментальными данными [4].

Выводы

В результате выполненного исследования разработана физико-математическая модель электровзрыва в конденсированной среде, включающая силовой и энергетический критерии разрушения материала. Модель позволяет проследить особенности преобразования энергии емкостного генератора в энергию волновых возмущений, приводящих к разрушению твердых тел. На основании эпюр тангенциального напряжения и распределения концентрации энергии в волне проанализированы условия зарождения и развития радиальных трещин, позволяющие прогнозировать картину разрушения материала.

Работа выполнена в рамках бюджетной программы «Грантовое финансирование научных исследований на 2015-2017 годы», по подприоритету: «Рациональное природопользование и обеспечение равновесного экологического состояния окружающей среды Казахстана», по теме: «Исследование электровзрывного воздействия на конденсированные среды для развития электроразрядных технологий откола и разрушения твердых материалов».

Список литературы

1. Буркин В.В. Особенности взрывного воздействия при импульсном электрическом пробое прочных сред // Физика горения и взрыва. –1985. – № 4. – С. 113–118.
2. Зиновьев Н.Т., Семкин Б.В. Исследование сопротивления канала пробоя твердых диэлектриков: ТВН и электрическая прочность изоляции // Межвузовский научно-технический сборник. – Томск, 1978. – С. 23–29.
3. Зиновьев Н.Т., Семкин Б.В. К уравнению энергобаланса искры в твердых диэлектриках // Журнал технической физики. – 1978. – Т. 48. – В. 3. – С. 624–626.
4. Курец В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов.– Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2002. – 324 с.
5. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений. Вычислительные методы в гидродинамике / Под ред. Ф Олдера. – М: Мир, 1967. – С. 212–263.
6. Физика взрыва / Под. ред. Станюковича К.П. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
7. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.

Рецензенты:

Важов В.Ф., д.т.н., кафедра электроэнергетических систем Энергетического института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск;

Пушкарёв А.И., д.ф.-м.н., кафедра техники и электрофизики высоких напряжений Института физики высоких технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.